基于软X射线成像技术的柑橘内部浮皮和枯水检测

许　骞，蔡健荣*，杜　灿，孙　力，白竣文

（江苏大学 食品与生物工程学院，江苏镇江 212013）

摘　要： 针对传统方法无法高效、无损地对柑橘浮皮和枯水进行检测的问题，本研究自制了一套软X射线成像系统，包括载物传送装置、软X射线成像装置、触发装置和软X射线防护装置。本研究根据宽皮柑橘物理特性确定检测参数，以柑橘图像的清晰度、对比度、畸变率为评判标准，通过调节成像装置参数，确定了最佳的成像参数为：X射线源的管电压60 kV，管电流1.3 mA，线阵探测器的积分时间5.5 ms，柑橘输送带的传送速度10 cm/s。通过圆孔金属板对列方向畸变进行检测，结果表明，传送速度稳定，列方向畸变可以忽略；利用70 mm不锈钢标定球对行方向上的畸变进行检测，计算了行方向上不同位置的投影畸变系数，并建立了畸变校正模型。在上述参数下采集柑橘的软X射线图像，采用高斯滤波对柑橘图像进行去噪处理；利用图像增强算法对去噪后的图像进行对比度增强处理；将固定阈值分割法和形态学算法融合，以去除柑橘图像背景区域、分离柑橘果肉区域和果皮区域。最后通过面积百分比法计算柑橘果肉面积和柑橘果实面积比判别柑橘内部浮皮程度；提取柑橘果实区域的灰度特征，获取柑橘枯水区域，计算柑橘枯水面积和柑橘果肉面积比，判别柑橘枯水程度。以清江椪柑为实验对象，结果表明自制软X射线成像装置对清江椪柑的浮皮和枯水的总体识别率分别为96.2%和86.9%。说明本研究提出的方法能够实现柑橘内部浮皮和枯水的无损检测。

关键词： 软X射线成像；柑橘；图像处理；浮皮；枯水；检测

中图分类号： TG115.28+1　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 202106-SA009

引用格式：许骞, 蔡健荣, 杜灿, 孙力, 白竣文. 基于软X射线成像技术的柑橘内部浮皮和枯水检测[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(4): 53-65.

XU Qian, CAI Jianrong, DU Can, SUN Li, BAI Junwen. Detection of peel puffing and granulation in citrus based on soft X-ray imaging technology[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(4): 53-65. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

柑橘具有极高的营养价值和保健价值[1]，种植范围遍及200多个国家和地区，年产量居全球水果首位。柑橘品质分级是增加其市场竞争力的关键步骤，而柑橘内部品质是柑橘分级的主要指标。影响柑橘内部品质的因素有浮皮、枯水、可溶性固形物、总酸、固酸比和可食率等，其中浮皮和枯水最为常见。柑橘浮皮会导致柑橘囊瓣膜与果皮分离，果皮和囊瓣膜之间产生空隙，而枯

收稿日期：2021-06-26　修订日期：2021-09-22

基金项目：国家现代农业产业技术体系资助（CARS-26）

作者简介：许　骞（1996—），男，博士研究生，研究方向为农产品食品无损检测技术及智能装备。E-mail：13813789415@163.com。

*通信作者：蔡健荣（1966—），男，博士，教授，研究方向为食品、农产品质量快速无损检测。电话：13952812631。E-mail：jrcai@ujs.edu.cn。

水会导致柑橘果实囊瓣皱缩、汁胞粗硬、果汁干枯[2,3]。

目前，在农产品无损检测[4]方面已经有许多较为成熟的技术，如光学分析法[5-7]、声学分析法[8-10]、机器视觉分析法[11-13]等。但对于农产品内部品质的无损检测仍存在一定的困难，目前主要通过生理生化指标判断水果内部品质，属于破坏性试验，检测效率低，无法用于大批量在线检测。软X射线因其超强的穿透性以及穿过不同物体时射线衰减量的差异，可以实现农产品内部品质特征的直观呈现，因此在农产品定性检测和定量检测方面得到广泛应用。

定性检测方面，软X射线穿透农产品到达探测器，将农产品的内部信息通过探测器呈现出来，通过对农产品内部不同部位软X射线衰减量的分析实现对农产品内部品质的定性分析。Dael等[14]利用软X射线成像技术对柑橘内部粒化进行研究，结合阈值分割、特征提取算法和朴素贝叶斯分类算法对柑橘健康果和缺陷果进行分类，样本分类准确率高达95.7%。Gadgile等[15]通过水果软X射线图像呈现的灰度差异，研究发现水果内部霉变区域呈深色，而未霉变区域呈现均匀的浅灰色，实现了对水果内部霉变的判别。童彤[16]利用软X射线断层扫描技术检测梨内部品质，将图像处理算法和支持向量机分类器融合，成功判别了梨内部品质并对缺陷梨和健康梨实现了有效分类，分类准确率高达90.2%～95.1%。在定量检测方面，通过将农产品的X射线图像灰度值及相关特征与定量测定指标建立线性或非线性的模型，实现对农产品品质的定量检测。叶创等[17]利用软X射线成像装置采集干桂圆图像，采用固定阈值与自适用阈值法对去噪和增强后的干桂圆图像进行处理，获取果肉与果核之间的分界线，实现二者分离，采用区域灰度预测方法准确地预测了干桂圆果肉质量。许杰[18]利用软X射线成像技术结合基于灰度直方图的图像分割算法，准确提取了水稻穗部籽粒参数，并设计了一套实时检测平台，成功实现了水稻穗部的总粒数、实粒数、空秕粒数和粒长参数的实时检测。

目前，针对柑橘内部浮皮和枯水的评估方法主要有生理生化指标评估和间接性评估（如光谱分析等）。生理生化指标评估对柑橘有破坏性，难以应用于批量在线检测；间接性检测手段虽然可以达到无损检测的目的，但无法直观观察柑橘内部品质信息，且准确度较低。鉴于软X射线技术能够可视化柑橘内部浮皮枯水的分布情况及严重程度以及其在农产品检测领域的广泛应用，本研究尝试利用软X射线成像技术对柑橘内部品质中的浮皮和枯水进行无损检测，目的在于解决传统检测具有破坏性、无法直观显示柑橘内部品质、难以实现批量在线检测的问题。

2 材料与方法

2.1 试验样本获取

根据农业行业标准NY/T 961-2006《宽皮柑橘》，可将宽皮柑橘按果径大小分为5类：55～60 mm的2S级微果，60～65 mm的S级小果，65～70 mm的M级中果，70～80 mm的L级大果和80～85 mm的2L级特大果。已有研究表明，柑橘内部的浮皮和枯水程度与柑橘果径呈正相关，80 mm以上的2L级特大果内部枯水和浮皮的概率远大于其他尺寸的果实，而60 mm以下的2S级微果几乎不会发生浮皮和枯水[19,20]。

本研究实验对象为2020年生产于湖北宜昌市的清江椪柑，为使研究更客观更具普适性，剔除80～85 mm的2L级特大果和55～60 mm的2S级微果，选取果径在60～80 mm不等的果实共580个。首先，对每个样本进行编号，随后进行软X射线图像采集，然后按照GB/ T 8210—2011《柑桔鲜果检验方法》和剖面观察法，逐个剖开580个柑橘样本检测柑橘的内部品质。为研究软X射线成像技术分别对柑橘浮皮和枯水的检测能力，将试验样本分为两部分。第一部分样本总数为290个，其中浮皮果58个，健康果232个；第二部分样本总数为290个，其中枯水果59个，健

康果231个。

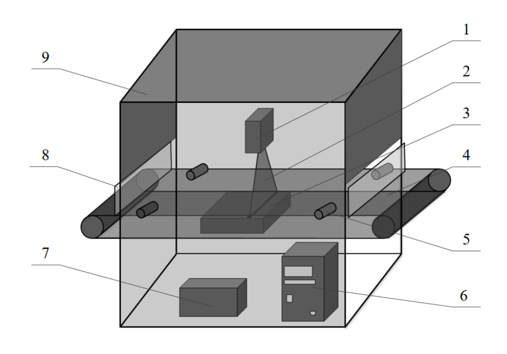
2.2 试验原理及装置

2.2.1 软X射线检测原理

软X射线的检测原理与其穿透性、荧光性和感光效应有关。当软X射线与被检测物相互作用时，由于被检测物组分、厚度的差异，导致了软X射线穿透被检测物时发生不同程度的强度衰减，不同衰减程度的射线被线阵探测器接收并转换成可见光，经过光电转换产生电信号。由于线阵探测器接收到的射线能量的差异，经由信号处理器处理后，电信号被转换为像素灰度值不同、层次存在差异的软X射线图像[21]。经过处理后，可获得被检测物体的内部缺陷或结构差异，以此达到检测的目的。已有研究表明，不超过10,000 Sv的食品辐射量，不会对食品安全性或营养价值产生影响，即农产品在软X射线的辐射下，内部品质不会发生任何改变，且对于操作人员而言，每小时吸收的X射线辐射量小于1 μSv，远低于国家标准[22]。

2.2.2 试验装置

试验装置包括载物传送装置、软X射线成像装置、触发装置和软X射线防护装置。载物传送装置主要由输送带、电动滚筒、驱动器和机架组成，完成柑橘物料的输送；软X射线成像装置主要由线阵探测器（X-Scan c5）、软X射线源（IXS100SE 150P149）、准直器和计算机组成，实现柑橘软X射线图像的采集和存储；触发装置包括两对对射式光电开关，为软X射线成像装置提供精确的采集时间和停止时间；软X射线防护装置主要由铅帘和铅板组成，吸收软X射线传播过程中散射的射线，减少对操作人员的辐射。图1为软X射线检测系统装置组成示意图。



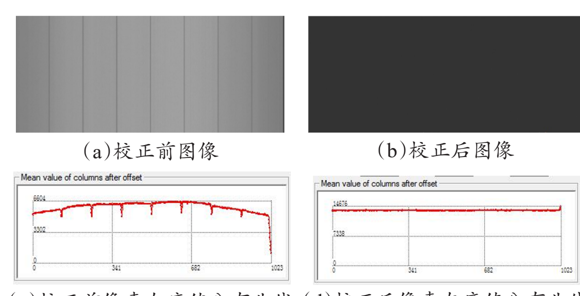
注：1. 软X射线源 2. 扇形软X射线束 3. 线阵探测器 4. 输送带 5. 光电开关 6. 计算机 7. 电源 8. 铅帘 9. 射线防护箱体

图1 软X射线柑橘检测系统装置组成示意图

Fig. 1 Soft X-ray citrus detection system device composition schematic diagram

针对辐射源射线的非一致性，本研究采用具有高稳定性的IXS100SE 150P149射线源，该型号射线源管电压变化率小于0.1%，可以有效减小辐射源导致的射线非一致性。

本研究采用的X-Scan c5型线阵探测器的像元由8块像元拼接而成，各个像元的效率存在差异，对于线阵探测器的非均匀性影响，可通过手动校正消除，主要步骤包括暗场校正和亮场图像补偿。校正后，成像质量得到了明显提高，成像均匀性较好，校正前后的图像对比如图2所示。



(a)校正前图像 (b)校正后图像

(c)校正前像素灰度值分布曲线 (d)校正后像素灰度值分布曲线

图2 背景图像暗场校正前后成像效果对比

Fig. 2 Background image dark field correction before and after the image imaging effect comparison

2.3 软X射线成像校正与采集参数选取

2.3.1 图像采集背景校正

影响线阵列扫描图像均匀性的主要因素为辐射源射线的非一致性和线阵探测器的非均匀性[23]。

2.3.2 积分时间参数的确定

本研究采用直径25 mm的1元人民币硬币进行最佳积分时间的标定，调节软X射线源管电压为60 kV，管电流为1.3 mA，输送带速度为10 cm/s，采集不同积分时间下的硬币图像。当

硬币长宽比等于1时，对应的积分时间为最理想的积分时间，如图3所示，通过对不同积分时间下的图像进行分析，可以得到最佳积分时间为5.5 ms。

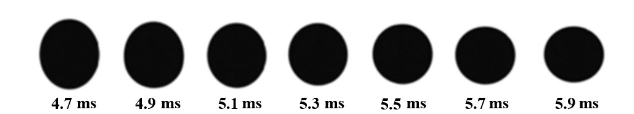


图3 不同积分时间下1元人民币硬币畸变图像

Fig. 3 Distorted images of the 1 RMB coin at different integration times

2.3.3 管电压参数确定

管电压是指软X射线管的工作电压，直接决定软X射线的光子能量及待检物的最大厚度，管电压越高，软X射线的波长越短，穿透能力越强。在传统的软X射线检测系统中，管电压参数需由专业人员依据图像质量进行主观设置，效率低下且准确性较差。随着软X射线成像技术的迅速发展，射线图像质量客观评价方法逐渐成熟，目前常用的射线图像质量评价函数主要有基于频率特征的评价函数、基于边缘灰度梯度的评价函数和基于信息学的评价函数[24]。本研究利用基于信息学的评价函数中的熵函数$F(n)$评价射线图像质量，其表达式为：

$$F(n) = -\sum\left(\frac{H_i}{N}\right)\ln\left(\frac{H_i}{N}\right) \tag{1}$$

其中，H_i为直方图中某灰度值的像素；N为总像素数。

图像的灰度熵大小可以表征图像像素点灰度值的离散情况，间接评价射线图像清晰度。因此，可以通过计算图像灰度熵大小获取图像清晰度，确定最佳管电压。将软X射线源的管电流设定为1.3 mA，线阵探测器积分时间设定为5.5 ms，分别采集35、40、45、50、55、60、65、70、75和80 kV的柑橘软X射线图像并计算图像的灰度熵，根据计算结果最终选取60 kV作为最佳采集电压。

2.3.4 管电流参数确定

管电流是指软X射线管的工作电流，决定了射线的强度，管电流越大，软X射线管产生的光子数量越多，采集的图像的对比度越好。当图像对比度达到最佳时，图像背景和前景之间的灰度值类间方差最大，可通过计算图像的灰度值类间方差确定管电流的最佳值。

对采集的柑橘软X射线图像进行图像预处理，随后进行图像分割，将柑橘区域记为A，计算柑橘区域的最大外接矩形，记为C；区域C和区域A做减运算，得到区域B；区域A、B占区域C的比例分别为W_a和W_b，区域A、B的像素均值分别为M_a和M_b，则可以得到灰度值类间方差V为：

$$V = W_a \times W_b \times \left(M_a - M_b\right)^2 \tag{2}$$

每间隔0.1 mA采集并分析柑橘图像，不同管电流下的灰度值类间方差如图4所示，当管电流为1.3 mA时灰度值类间方差最大，图像的对比度最好。

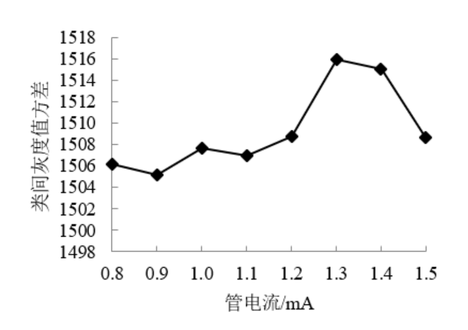


图4 不同管电流参数条件下柑橘图像类间方差

Fig. 4 Inter-class variance of citrus images under different tube current parameters

2.4 软X射线成像几何畸变分析和校正

2.4.1 列方向畸变检测及输送速度稳定性分析

输送带输送速度的稳定性是影响X射线图像列方向是否失真的重要因素。在管电压60 kV、管电流1.3 mA、积分时间5.5 ms的图像采集条件下，采用等间距金属圆孔板进行列方向畸变检测，并对输送带输送速度进行稳定性分析，标定板处理过程如图5所示。

保持圆孔标定板位置不变，多次采集圆孔板软X射线图像，对其进行处理，采用基于亚像素

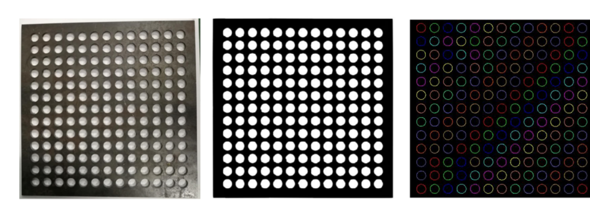

(a)实物图 (b)软X射线图像 (c)圆孔区域

图5 列方向畸变检测试验标定板处理过程

Fig. 5 Column directional distortion detection test calibration plate processing

轮廓的圆拟合获取区域的圆心，统计圆孔板列方向上相邻孔的圆孔间距。根据程序运行结果，圆孔间距在36.9个像素左右，圆孔间距偏差小于1个像素，说明输送速度稳定，软X射线图像列方向不存在失真。

2.4.2 行方向投影畸变及校正

行方向上图像畸变受X射线源的投影方式影响，软X射线投影模型如图6所示，成像区域分为近似垂直投影区域和斜投影区域，在近似垂直投影区域，得到的软X射线图像畸变最小，行方向拉伸程度最小。因此，要得到检测对象的实际像素尺寸，必须对行方向上的投影畸变进行标定，得到图像行坐标与图像实际像素宽度的关系。

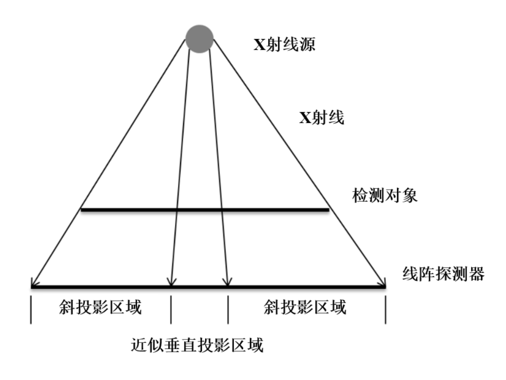


图6 软X射线成像系统投影模型

Fig. 6 Soft X-ray imaging system projection model

本研究采用70 mm的实心不锈钢球作为标定材料，使用软X射线成像系统采集传送带运动过程中标定材料的软X射线图像，通过固定阈值法分割出不锈钢球区域，提取每个不锈钢球平行于坐标系的最小外接矩形的宽度作为不锈钢球的直径。

通过对多次采集的射线图像进行处理，统计不锈钢球的最小外接矩形的宽度值，将球的中心行坐标设定为横坐标，球的宽度值为纵坐标，进行多项式拟合，结果如图7所示。

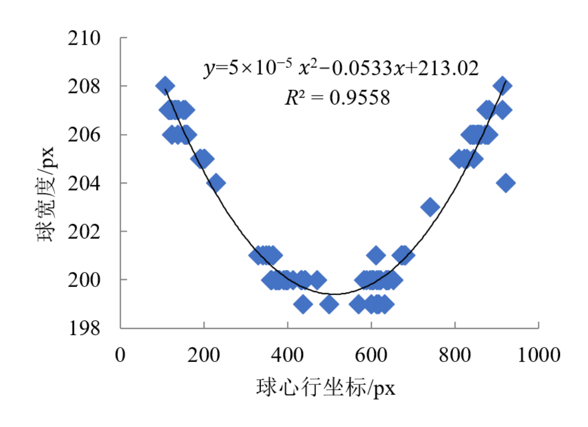


图7 不锈钢球标定行方向畸变拟合图

Fig. 7 Stainless steel ball calibration line directional distortion fitting diagram

采用多项式模型拟合可以得到标定球行坐标x和标定球实际像素直径y之间的关系：

$$y = 5 \times 10^{-5}x^2 - 0.0533x + 213.02 \tag{3}$$

当标定球位于近似垂直投影区域的中心时，球的宽度为199～200个像素，取平均值199.5个像素作为标定球无畸变宽度，则标定球在行方向上的畸变系数k为：

$$k = \frac{5 \times 10^{-5}x^2 - 0.0533x + 213.02}{199.5} \tag{4}$$

3 检测方法及结果分析

本研究通过软X射线成像技术获取柑橘图像，经过3×3高斯滤波图像去噪、图像对比度增强进行图像预处理，然后通过固定阈值分割、形态学处理等实现果肉与果皮的分割以及枯水区域的提取，最后计算柑橘果肉面积和柑橘果实面积比判别柑橘内部浮皮程度。通过提取柑橘果实区域的灰度特征，计算柑橘枯水面积和柑橘果肉面积比，判别柑橘枯水程度。图8为基于软X射线成像技术的柑橘内部浮皮和枯水检测方法流程。

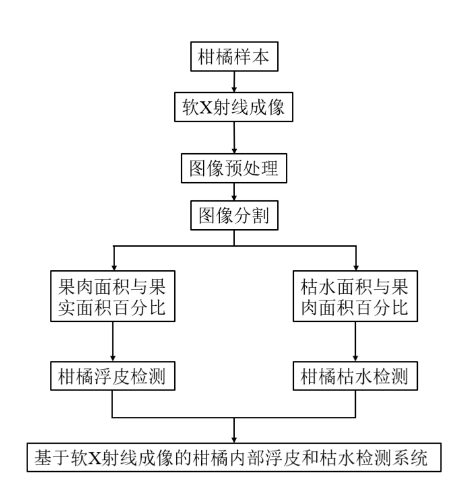


图8 基于软X射线成像技术的柑橘内部浮皮和枯水检测方法流程

Fig. 8 Procedure for the detection of peel puffing and granulation inside citrus based on soft X-ray imaging technology

3.1 图像采集

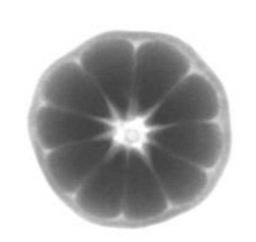
设备运行前，需对软X射线源进行训管操作，随后按表1对软X射线成像装置进行参数设定，正式采集前将设备预热10 min，保证软X射线源发出的射线束能量稳定，且输送带输送速度平稳。

表1 柑橘浮皮和枯水检测软X射线成像装置参数

Table 1 Citrus peel puffing and granulation detection soft X-ray imaging device parameters

装置参数	数值
软X射线源管电压/kV	60
管电流/mA	1.3
线阵探测器积分时间/ms	5.5
图像高度/px	1024
抓取模式	帧抓取
扫描方向	垂直扫描
输送速度/($cm \cdot s^{-1}$)	10

如图9所示，当果心轴心与软X射线光束平行时，得到的柑橘射线图像清晰，成像效果最好。当果心轴心与软X射线光束垂直或果心轴心与软X射线光束存在一定的夹角时，柑橘囊瓣之间相互覆盖，掩盖了柑橘果心空隙位置，得到的柑橘软X射线图像结构不清晰。因此，采集柑橘软X射线图像前，需剔除果型畸形、表面碰伤和发生霉变的异常柑橘样品，采集时保证柑橘果心轴心与软X射线光束平行。



(a)轴心与射线光束平行



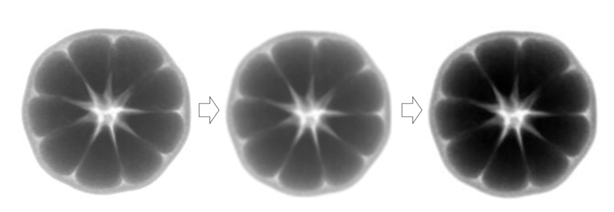
(b)轴心与射线光束垂直

图9 不同摆放方式的柑橘软X射线图像

Fig. 9 Soft X-ray image of citrus in different arrangements

3.2 图像预处理

环境变化以及外界干扰都会降低图像的成像质量，为了更清晰地获取柑橘内部枯水和浮皮的分布情况和严重程度，需要对采集的柑橘X射线图像进行滤波去噪、特征增强等处理手段，处理过程如图10所示。



(a)原始图像 (b)3×3高斯滤波图像 (c)图像增强

图10 基于软X射线的柑橘图像预处理

Fig. 10 Soft X-ray based image pre-processing of citrus

3.2.1 图像去噪

本研究利用3×3、5×5和7×7三种尺寸的均值滤波、中值滤波和高斯滤波对柑橘图像进行去噪处理。利用均方误差（Mean Square Error，MSE）和峰值信噪比（Peak Signal-to-Noise Ratio，PSNR）两种图像质量评价函数评价不同滤波方法的去噪效果，选取最佳滤波方法及参数[25]。

MSE通过对比去噪前和去噪后每一个像素点的灰度差，判断图像的去噪质量，MSE越小，图像成像质量越好。PSNR是对MSE进一步优化的结果，峰值信噪比与图像质量呈正相关，峰值信噪比越大，图像失真程度越小。表2为不同滤

波去噪处理后图像的MSE和PSNR值。

表2 基于软X射线的柑橘浮皮和枯水检测不同滤波方法去噪后的图像MSE和PSNR值

Table 2 MSE and PSNR values of images after denoising by different filtering methods for soft X-ray based citrus peel puffing and granulation detection

滤波方法	高斯滤波			均值滤波			中值滤波		
核大小	3×3	5×5	7×7	3×3	5×5	7×7	3×3	5×5	7×7
MSE	2	4	12	4	14	31	10	25	52
PSNR	45.12	42.11	37.34	42.11	36.67	33.22	38.13	34.15	30.97

结果表明，3×3高斯滤波的去噪效果最佳，因此，本研究采用3×3高斯滤波对采集的图像进行去噪，图10（b）为3×3高斯滤波去噪处理后的柑橘图像。

3.2.2 图像增强

软X射线成像受射线强度、环境和元器件制造工艺的影响，图像质量普遍较低，对比度不佳。本研究采用灰度变换和边缘灰度值增强算法，对去噪后的软X射线图像进行增强。

（1）灰度变换。通过改变图像的灰度范围，拉伸图像灰度值以增强图像对比度，细化图像特征。

假设灰度变换前f（x，y）的灰度范围集中在［m，n］内，对其进行灰度变换后，使其灰度范围扩大到最大范围［min，max］，拉伸图像灰度值，以增强图像对比度。灰度变换的表达式为：

$$g(x,y)=\frac{max-min}{n-m\left[f(x,y)-m\right]min} \tag{5}$$

（2）边缘灰度值增强。为避免图像去噪导致的图像纹理和边缘模糊，采用边缘灰度值增强算法增强图像的高频区域，实现对图像的锐化。算法流程如下：

①使用3×3高斯滤波对原图像进行去噪处理；

②设f（x，y）是原图像第i行j列对应像素点的灰度值，g（x，y）为高斯滤波后该像素点的灰度值，将f（x，y）和g（x，y）做减运算，运算结果取整后乘以一定比例系数叠加到原图像上，处理后的像素灰度值为h（x，y），计算公式如下：

$$h(x,y)=round\left[\left(f(x,y)-g(x,y)\right)\times factor\right]+f(x,y) \tag{6}$$

其中，$round$为取整函数；$factor$为比例系数。通过调整比例系数，对比增强效果，最终选取1.0作为增强比例系数。图10（c）为灰度变换及边缘灰度值增强后的柑橘图像。

3.3 图像分割

柑橘图像分割主要包括柑橘果实区域与背景区域、柑橘果肉区域与果皮区域的分割。本研究对比了多种分割方法的分割效果。图像分割效果如图11所示，结果表明，相比于其他分割方法，固定阈值法漏分割区域较少，经过二值化、区域填充、开闭运算、形状选择等形态学方法处理后，可以得到完整的柑橘果实区域图像。因此，最终选择固定阈值法分割柑橘果实区域与背景区域。

获取柑橘果实区域后，需进一步分割获取柑橘果肉区域，便于后期柑橘内部特征的提取。通过观察灰度直方图发现，当分割阈值设定为123时，固定阈值法可以很好地分割柑橘果肉区域与果皮区域。虽然分割得到的区域有时会出现细小的果皮区域，但通过连通域标记和形状选择，最终仍可以实现柑橘果肉区域与果皮区域的分割。

3.4 柑橘尺寸测定

为了将柑橘样本根据横径大小进行分级，需将从柑橘软X射线图像中获取的像素尺寸转换为实际尺寸，本研究采用直径60、70和80 mm的不锈钢实心球对像素精度进行测定，结果如表3所示，最终确定系统的像素精度p为0.35 mm/px。

本研究采用最小外接矩形法对柑橘横径进行测定。首先对采集到的柑橘软X射线图像进行图像预处理及图像分割，得到去除背景的柑橘图像。然后确定图像质心坐标，将图像绕质心旋

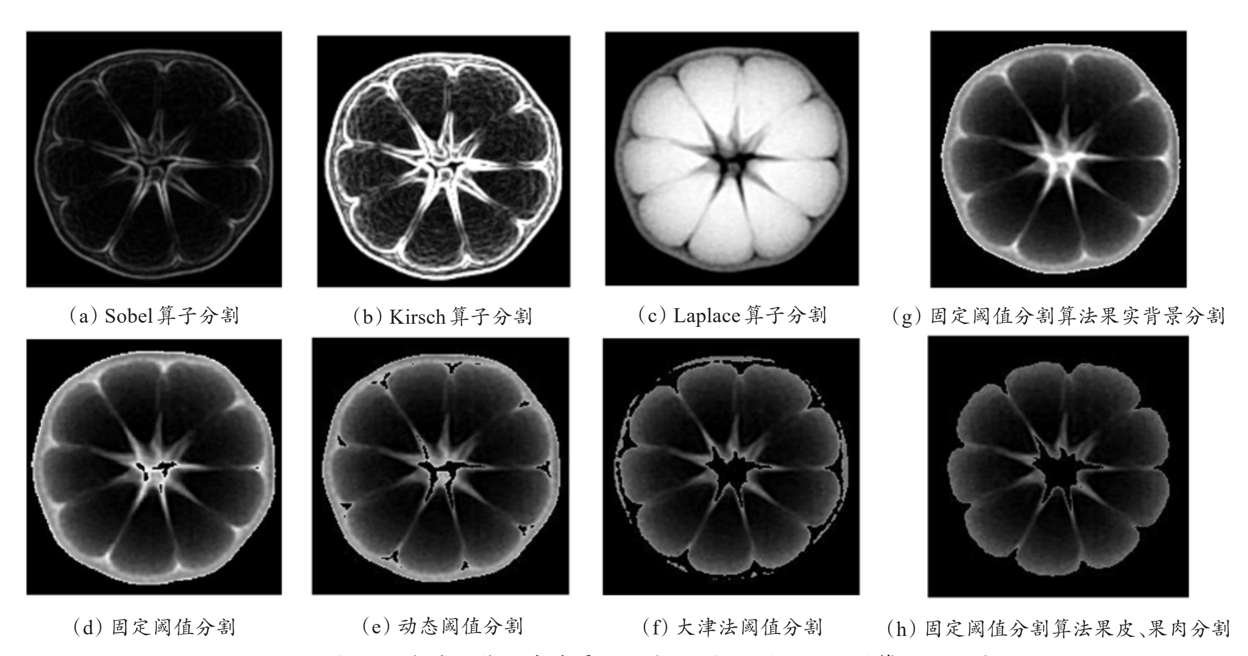


图 11　柑橘软X射线图像果实背景及果皮、果肉分割不同分割算法效果对比

Fig. 11 Comparison of different segmentation algorithms for citrus soft X-ray image fruit background and fruit skin and flesh segmentation

表3　软X射线成像系统像素精度

Table 3 Pixel accuracy of soft X-ray image system

标定对象	像素尺寸/px	实际尺寸/mm	像素精度/(mm·px^{-1})
1	173	60	0.346
2	200	70	0.350
3	231	80	0.346

转，单次旋转角度为3°，绕质心旋转一周，每旋转一次，获取该角度下图像的外接矩形，最后面积最小的外接矩形即为该柑橘图像的最小外接矩形，柑橘图像最小外接矩形的最大边长即为柑橘横径 d。

按公式（3）和公式（4）对图像行方向投影畸变进行校正，校正后柑橘横径 D 的计算公式为：

$$D = \frac{d}{k} \tag{7}$$

柑橘横径实际尺寸 D_L 的计算公式为：

$$D_L = D \times p \tag{8}$$

将处理得到的柑橘横径实际尺寸与实际测量的柑橘横径相比较，利用软X射线成像技术测量的柑橘横径的平均误差为2.45 mm，最大偏差为6.67 mm，获得了较好的效果。

3.5 柑橘内部浮皮检测

3.5.1　柑橘浮皮分级标准

传统的柑橘浮皮缺陷等级判定方法，利用剖面观察法将柑橘沿果萼和果梗方向剥开，由多人评价是否浮皮与浮皮等级，此方法受限于观察人员的经验水平，无法实现大批量等级分级。因此本研究通过剖面观察法判断柑橘是否为浮皮果，再借助软X射线成像技术，利用面积百分比定量分析柑橘内部浮皮程度，并给出相应等级，分级标准如表4所示。

3.5.2　柑橘浮皮检测算法

浮皮果的果肉区域和果皮区域之间存在明显间隙，健康果的果肉区域和果皮区域结构紧密，呈现出良好的致密度和完整度。本研究根据柑橘果肉区域的面积和柑橘果实区域面积的比值大小对柑橘浮皮进行分级。设柑橘果实区域的面积为 $Area$，柑橘果肉区域的面积为 $Area_1$，则果肉区域面积百分比 $Area_{p1}$ 为：

表4 柑橘浮皮程度分级

Table 4 Classification of peel puffing citrus

果肉区域面积百分比/%	浮皮等级	特征描述
(70,—)	1级(健康果)	囊瓣膜与果皮、果皮与囊衣无空隙症状
(60,70]	2级(轻微浮皮)	囊瓣与果皮、果皮与囊衣分离,未扩散整个果肉
(—,60]	3级(重度浮皮)	囊瓣与果皮、果皮与囊衣完全分离

$$Area_{p1} = \frac{Area_1}{Area} \times 100\% \quad (9)$$

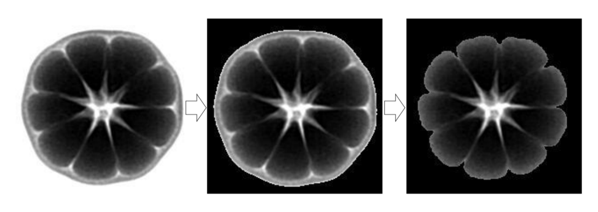
具体步骤如下：

（1）对采集到的原始软X射线图像进行图像去噪和图像增强，得到去噪和增强后的图像。如图12（a）所示。

（2）采用固定阈值法去除图像背景区域，通过形状填充或闭运算等一系列形态学算法填充果实区域空洞，获取柑橘果实区域图像，如图12（b）所示。

（3）再次采用固定阈值法和形态学算法分割柑橘果肉区域和果皮区域，获取柑橘果肉区域图像，如图12（c）所示。

（4）通过图像处理软件，调用区域面积计算算子，获取果实区域面积和果肉区域面积，然后计算果肉区域面积百分比。



(a)图像预处理　(b)图像背景分割　(c)果皮、果肉分割

图12 柑橘浮皮检测算法步骤

Fig. 12 Algorithm detection steps of peel puffing citrus

3.6 柑橘内部枯水检测

3.6.1 柑橘枯水分级标准

根据GB/ T 8210—2011《柑桔鲜果检验方法》，将宽皮柑橘类果实枯水依据囊瓣汁胞枯水程度分成四个等级，分别是健康果、轻微枯水果、中度枯水果和重度枯水果，具体分级标准如表5所示。

表5 柑橘枯水程度分级

Table 5 Classification of citrus granulation

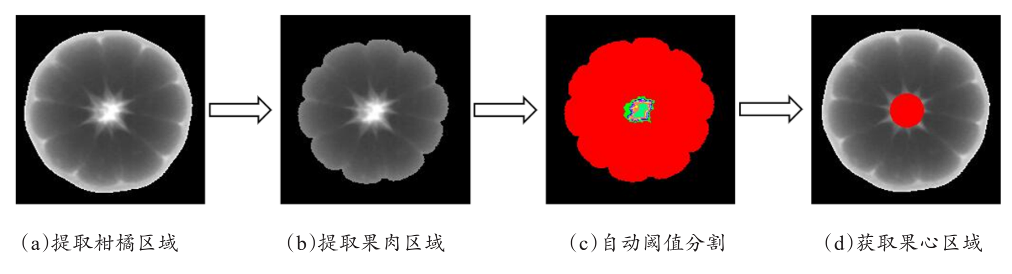
枯水区域面积百分比/%	枯水等级	特征描述
0	1级(健康果)	果皮正常,皮肉紧贴,汁胞正常,果汁丰满
(0,25)	2级(轻微枯水)	囊瓣略有皱缩,橙色变淡,少数汁胞呈轻微枯水
[25,50]	3级(中度枯水)	囊瓣皱缩,皮出现白色小点,囊瓣内有50%汁胞枯水
(50,—)	4级(重度枯水)	囊瓣明显皱缩,皮上有白斑,囊瓣和汁胞大部分枯水

3.6.2 柑橘枯水检测算法

（1）柑橘果心大小的测定。柑橘果心大小是指柑橘果实赤道部横切面中心柱的直径。柑橘枯水普遍发生在柑橘果肉区域，为准确检测柑橘内部枯水情况，需剔除柑橘果心区域，避免果心区域对检测结果造成影响。本研究采用自动阈值法提取柑橘果心区域，以果心区域最小外接圆作为果心大小，算法步骤如图13所示。

根据公式（3）～（4）和公式（7）～（8）计算柑橘果心直径实际物理尺寸，采用最小外接矩形法计算柑橘果肉直径，经统计分析可知柑橘果心直径和果肉直径比值在0.3上下浮动。因此，本研究取柑橘果心直径和果肉直径比值为0.3，以此确定果心大小，有助于准确剔除柑橘果心区域，减少柑橘果心区域对内部枯水检测结果的影响。

（2）柑橘枯水检测算法。柑橘发生枯水后，软X射线成像时果肉区域会出现白色斑点，枯水区域较亮，健康区域较暗，因此对柑橘内部枯水的检测依旧采用面积百分比法，通过计算柑橘枯



(a)提取柑橘区域　(b)提取果肉区域　(c)自动阈值分割　(d)获取果心区域

图 13　柑橘果心提取算法流程及结果展示

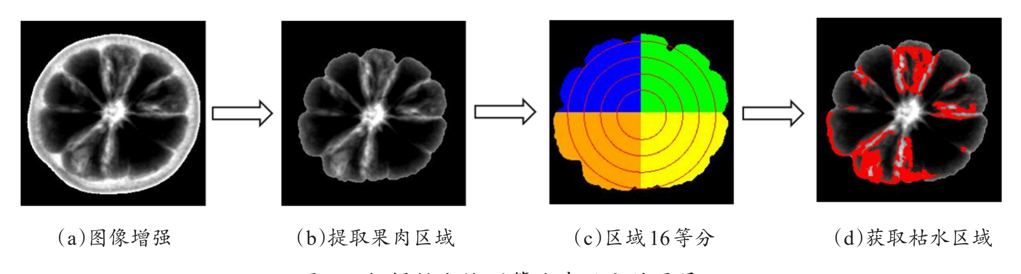
Fig. 13 Algorithm detection steps and results of citrus fruit core extraction

水区域面积和柑橘果肉区域面积的百分比实现对柑橘枯水的检测。柑橘果肉区域的面积为 $Area_1$，柑橘枯水区域的面积为 $Area_2$，则枯水区域面积百分比 $Area_{p2}$ 为：

$$Area_{p2} = \frac{Area_2}{Area_1} \times 100\% \quad (10)$$

柑橘不同部位厚度不同，造成射线图像不同区域灰度存在一定的差异，对枯水区域的提取带来较大的困难。由于在相同半径上果实高度差异不大，像素点灰度值仅受物料特性影响，即枯水导致的像素点灰度值变化。因此为消除柑橘厚度对枯水区域提取带来的影响，本研究将柑橘果肉区域分割为相同半径上的16个区域，在每个区域分别进行枯水区域提取。

柑橘枯水检测算法步骤如图14所示，对原始图像进行图像增强并提取果肉区域，对提取的果肉区域进行轮廓拟合，获取区域最小外接圆和外接圆半径 R。由于果心大小为柑橘果肉大小的0.3倍，因此分别以0.3R、0.5R、0.7R、0.9R 和 R 为半径将柑橘软X射线图像划分成5个圆环区域。其中，0.3R 的圆为柑橘果心区域，不对其进行处理。考虑到柑橘果肉区域不绝对对称，厚度并不完全一致，因此在每个圆环区域内将柑橘图像划分成4等分，共将柑橘果肉区域划分成16个区域。在每个区域内使用自动全局阈值法和局部阈值法分别识别和提取图14（b）所示的暗区域和较亮区域，其中暗区域表示健康的果肉区域、较亮区域表示囊瓣间隙，将16等分的各个区域与提取的暗区域和较亮区域做减法即获得灰度值介于健康果肉区域和囊瓣间隙之间的枯水区域，通过图像处理软件调用区域面积计算算子，获取枯水区域和果肉区域面积，计算枯水区域的面积百分比。



(a)图像增强　(b)提取果肉区域　(c)区域16等分　(d)获取枯水区域

图 14　柑橘枯水检测算法步骤和结果展示

Fig. 14 Algorithm detection steps and results of citrus granulation

3.7 结果分析

本研究通过软X射线成像技术获取柑橘图像，采用固定阈值法结合形态学算法去除图像背景区域，分割柑橘枯水区域、果肉区域和果皮区域，利用面积百分比法判别柑橘内部浮皮和枯水等级。按照剖面观察法和GB/T 8210—2011《柑桔鲜果检验方法》，逐个剖开580个柑橘样本检测柑橘的内部品质。检测结果如表6和表7所示，在柑橘浮皮检测实验中，样品量为290个，采集

软X射线图像，通过面积百分比法对柑橘浮皮进行判别，正确检出279个，误判11个，检测准确率为96.2%，误判率为3.8%，产生误判的原因可能是柑橘在传送过程中发生翻转，造成囊瓣叠加，影响检测结果。在柑橘枯水检测实验中，样品量为290个，采集软X射线图像，通过面积百分比法对柑橘枯水进行判别，正确检出252个，误判38个，检测准确率为86.9%，误判率为13.1%，产生误判的原因可能是图像分割过程中未完全剔除柑橘果心区域和囊瓣分离造成的空白区域，从而影响检测结果。

表6 基于软X射线成像技术的柑橘内部浮皮检测结果

Table 6 Results of peel puffing detection in citrus based on soft X-ray imaging

果实大小/mm	调查果数/个	浮皮程度			准确检测数/个	准确率/%
		无/个	轻/个	重/个		
S(60～65)	130	127	3	0		
M(65～70)	70	61	7	2	279	96.2
L(70～80)	90	44	35	11		

表7 基于软X射线成像技术的柑橘内部枯水检测结果

Table 7 Results of granulation detection in citrus based on soft X-ray imaging

果实大小/mm	调查果数/个	枯水程度				准确检测数/个	准确率/%
		无/个	轻/个	中/个	重/个		
S(60～65)	130	122	8	0	0		
M(65～70)	70	55	11	4	0	252	86.9
L(70～80)	90	54	20	12	4		

注：S表示小果；M表示中果；L表示大果

4 结 论

针对柑橘内部品质快速无损检测的难点，本研究应用软X射线成像技术结合图像处理方法，对柑橘内部的浮皮和枯水等级进行检测，浮皮果的检测准确率为96.2%，枯水果的检测准确率为86.9%。试验证明，采用软X射线成像技术对柑橘内部品质的无损检测是可行的，在柑橘内部品质的浮皮和枯水检测中均获得了较高的准确率。同时，软X射线成像技术还可应用于其他农产品品质检测，通过与其他无损检测技术结合，实现农产品内外品质的综合评价。

参考文献：

[1] 周志钦, 陆柏益. 柑橘果实商品品质评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
ZHOU Z, LU B. Evaluation method of commodity quality of citrus fruit[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2020.

[2] 陈秀伟, 张百超. 红桔果实浮皮的研究[J]. 园艺学报, 1988(1): 13-17.
CHEN X, ZHANG B. Studies on the rind puffing of the fruit of 'hong-ju' (citrus reticulata blanco)[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1988(1): 13-17.

[3] 陆平波, 赵昆松, 鲍江峰, 等. 柑橘枯水影响因素及调控措施研究进展[J]. 农业科技通讯, 2016(1): 155-159.
LU P, ZHAO K, BAO J, et al. Research progress on factors influencing citrus water blight and regulatory measures[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2016(1): 155-159.

[4] 孔静, 谢鸣. 无损检测技术在农产品品质检测方面的应用[J]. 消费导刊, 2009(16): 210.
KONG J, XIE M. Application of non-destructive testing technology in quality testing of agricultural products[J]. Consume Guide, 2009(16): 210.

[5] 刘爽, 柴春祥. 近红外光谱技术在水产品检测中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(21): 8590-8596.
LIU S, CHAI C. Application progress of near infrared spectroscopy in aquatic products detection[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(21): 8590-8596.

[6] 陈伟. 基于近红外光谱与生物散斑融合的牛肉掺假检测方法[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
CHEN W. Detection method for beef adulteration based on data fusion between near-infrared spectroscopy and bio-speckle imaging[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.

[7] 郭志明. 基于近红外光谱及成像的苹果品质无损检测方法和装置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
GUO Z. Nondestructive detection techniques and devices for assessing quality attributes of apple based on NIR spectroscopy and hyperspectral imaging[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.

[8] 刘妍, 周新奇, 俞晓峰, 等. 无损检测技术在果蔬品质检测中的应用研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 27-37.

LIU Y, ZHOU X, YU X, et al. Research progress of nondestructive testing techniques for fruit and vegetable quality[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science Edition), 2020, 46(1): 27-37.

[9] 王艳萍. 基于超声检测的沙窝萝卜品质评价方法研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
WANG Y. Study on quality evaluation method of Shawo radish based on ultrasonic texting[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.

[10] ABBASZADEH R, RAJABIPOUR A, YING Y, et al. Nondestructive determination of watermelon flesh firmness by frequency response[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(1): 637-640.

[11] 王旭. 基于机器视觉的柑橘分级技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
WANG X. Research on the classification technology of citrus based on machine vision[D]. Changsha: Hunan University, 2016.

[12] AGUILERA PUERTO D, MARTÍNEZ GILA D M, GÁMEZ GARCÍA J, et al. Sorting olive batches for the milling process using image processing[J]. Sensors, 2015, 15(7): 15738-15754.

[13] 王风云, 封文杰, 郑纪业, 等. 基于机器视觉的双孢蘑菇在线自动分级系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 256-263.
WANG F, FENG W, ZHENG J, et al. Design and experiment of automatic sorting and grading system based on machine vision for white agaricus bisporus [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34 (7): 256-263.

[14] VAN DAEL M, LEBOTSA S, HERREMANS E, et al. A segmentation and classification algorithm for online detection of internal disorders in citrus using X-ray radiographs[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 112: 205-214.

[15] GADGILE D, LANDE B R, DHABDE A S, et al. X-ray imaging for detecting lack mould rot of sapota (*Achras sapota*) fruit[J]. Plant Pathology & Quarantine, 2017, 7(2): 92-94.

[16] 童彤. 比利时: X射线可无损检测梨品质[J]. 中国果业信息, 2020, 37(3): 44.
TONG T. Belgium: X-ray non-destructive detection of pear quality[J]. China Fruit News, 2020, 37(3): 44.

[17] 叶创, 蔡健荣, 袁雷明, 等. 基于X射线图像的干桂圆果肉质量预测[J]. 食品科技, 2016, 41(1): 264-268.
YE C, CAI J, YUAN L, et al. Prediction of dry longan flesh weight based on X-ray imaging[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(1): 264-268.

[18] 许杰. 基于X射线数字成像技术的水稻穗部籽粒检测方法研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2016.
XU J. Research on rice spike seed detection method based on X-ray digital imaging technology[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2016.

[19] 石学根, 徐建国, 张林, 等. 温州蜜柑完熟果实的浮皮与贮藏性之间的关系[J]. 浙江农业学报, 2008(4): 304-307.
SHI X, XU J, ZHANG L, et al. The relationship between peel puffing and storage of full ripe fruits of Satsuma mandarin[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2008(4): 304-307.

[20] 温明霞, 石学根, 王鹏, 等. 不同大小温州蜜柑果实贮藏期枯水的生理特征研究[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(1): 59-63.
WEN M, SHI X, WANG P, et al. Physiological characteristics of different sizes of Satsuma mandarin fruit with granulation during storage stage[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(1): 59-63.

[21] 刘赐德. 基于X射线透射成像的叶中含梗率在线检测技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
LIU C. Research of the on-online detection of stem ratio in the tobacco leaf based on X-ray transmission imaging[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.

[22] 梅特勒. 使用X射线检测的食品安全性如何?[J]. 食品安全导刊, 2011(5): 46-47.
METTLER. How safe is the food detected by X-rays? [J]. China Food Safety Magazine, 2011(5): 46-47.

[23] 屈国普, 凌球, 郭兰英, 等. X射线线阵列探测器数字图像的非均匀性原因分析[J]. 核电子学与探测技术, 2003(5): 414-416.
QU G, LING Q, GUO L, et al. Analysis of the cause for the ununiformity of X-ray detector line array of digital image[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003(5): 414-416.

[24] 巫军, 王黎明, 史振华, 等. X射线成像系统数字图像质量评价方法研究[J]. 传感器世界, 2010, 16(4): 6-9.
WU J, WANG L, SHI Z, et al. Digital image quality evaluation method of X-ray imaging system[J]. Sensor World, 2010, 16(4): 6-9.

[25] 张玉叶, 赵育良, 郭星香. 航空侦察图像质量评估的

适用方法分析[J]. 信息技术与信息化, 2020(9): 140-143.
ZHANG Y, ZHAO Y, GUO X. Analysis of applicable methods for air reconnaissance image quality evaluation[J]. Information Technology and Informatization, 2020(9): 140-143.

Detection of Peel Puffing and Granulation in Citrus Based on Soft X-ray Imaging Technology

XU Qian, CAI Jianrong*, DU Can, SUN Li, BAI Junwen

(*School of Food and Biological Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: The internal quality of citrus is an important index for citrus grading, and the most common factors affecting the internal quality of citrus are peel puffing and granulation, which affect the fruit quality and lose the market value due to the large consumption of nutrients. In this study, a soft X-ray imaging device was developed, including a transmission device, a soft X-ray imaging device, a trigger device and a soft X-ray protection device, for the problem that traditional methods cannot detect citrus peel puffing and granulation efficiently and non-destructively. In this research, the detection parameters were determined according to the physical characteristics of wide peeled citrus, and the clarity, contrast and aberration rate of citrus images were used as the judging criteria. The best imaging parameters were determined by adjusting the parameters of the imaging device as follows: The tube voltage of X-ray source was 60 kV, the tube current was 1.3 mA, the integration time of line array detector was 5.5 ms, and the transmission speed of citrus conveyor belt was 10 cm/s. The aberrations in the column direction were detected by the circular hole metal plate, and the results showed that the transmission speed was stable and the aberrations in the column direction were negligible. The aberrations in the row direction ware detected by using the 70 mm stainless steel calibration sphere, and the projection aberration coefficients at different positions in the row direction were calculated, and the aberration correction model was established. The soft X-ray images of citrus were acquired under the above parameters, and Gaussian filtering was used to denoise the citrus images. The image enhancement algorithm was used to enhance the contrast of the denoised images. The fixed threshold segmentation method and morphological algorithm were fused to remove the background area, separate the flesh area and the peel area of the citrus images. Finally, the area percentage method was used to calculate the ratio of citrus flesh area to citrus fruit area to discriminate the degree of citrus peel puffing; the grayscale features of citrus fruit area were extracted to obtain the citrus withered area, and the ratio of citrus withered area to citrus flesh area was calculated to discriminate the degree of citrus granulation. Qingjiang Ponkan were taken as the experimental object, and the results showed that the overall recognition rate of the homemade soft X-ray imaging device were 96.2% and 86.9% for the peel puffing and granulation of Qingjiang Ponkan, respectively. The method proposed in this study may achieve nondestructive detection of peel puffing and granulation inside citrus.

Key words: soft X-ray imaging; citrus; image processing; peel puffing; granulation; detection